

ENTWICKLUNG DER TECHNOLOGIE IN MIKROFRÄSEN

Márton TAKÁCS

Zoltán Bay Stiftung für Angewandte
Forschungsinstitut für Materialforschung
H-1116 Budapest Fehérvári u. 130.
Tel. +36 1 463 0500
Fax. +36 1 463 0529

Eingegangen am 5 Juni, 1999

Zusammenfassung

At the bigenning of the third millennium larger and larger demands and efforts arise on miniaturising of small parts and systems on almost every field of the industry. The transplantation of conventional chip removal processes into the micrometer scale dimensions shows a very promising alternative for the production in small and medium lot sizes. Out of these methods milling offers the most variable machining possibility. During my micromilling researches I tried to find the optimal process parameters for the machining of two different metallic materials with hard metal end mill, and I examined the surface and the geometric quality of the machined structures.

Keywords: miniaturising, micromilling, micro-end-mill.

1. Einleitung

Es lassen sich im wesentlichen zwei grundsätzliche Entwicklungstendenzen feststellen. Einerseits ist eine Steigerung der Anforderungen an die Bearbeitungs-genauigkeit von Komponenten und deren Funktionsflächen zu beobachten und zum anderen findet eine zunehmende Miniaturisierung der Bauteile statt. Die Miniaturisierung von Werkstücken und Systemen wird nach allen Vorankündigungen in den nächsten Jahren mit exponentieller Zunahme vorrücken. Die Mikrosystemtechnik spielt auch heutzutage auf allen Gebieten der Industrie eine unentbehrliche Rolle (z.B. Automobilindustrie, Informationstechnik, Medizintechnik, Meß- und Regelungstechnik).

2. Stand der Mikrozerspanung

Die bisher verwendeten Methoden für die Herstellung von Mikrostrukturen können nur unter bestimmten Umständen in Frage kommen. Wegen der Entwicklung der Mikrosystemtechnik aus der Mikroelektronik stammen die zuerst verwendeten Fertigungsverfahren ebenfalls aus diesem Bereich. So sind die Naß- und Trockenätzverfahren, die LIGA-Technologie zur Zeit die verbreitesten Herstellungsverfahren

Tabelle 1. Vorteile der Mikrozerspanung

Flexibilität	Schnelligkeit	Formenvielfalt
alle spanenden Strukturierungsverfahren auf einer Maschine	hohes Zeitspanungsvolumen	Unabhängigkeit von Kristallorientierung
alle Werkstoffe der Mikrosystemtechnik bearbeitbar	Komplettbearbeitung auf einer Maschine	variable Werkzeugform
-eingebunden in CIM-Automatisierungskonzept	Keine Masken nötig	frei programmierbare Werkzeugbewegung

für mikrostrukturierte Bauteile. Bei geringen Stückzahlen weisen solche maskengestützte Fertigungsverfahren – besonders bei großen Strukturen mit langen Ätzzeiten – eine schlechte Wirtschaftlichkeit auf. Ein weiterer Nachteil ist das eingeschränkte Formenspektrum, aufgrund der Anisotropie des Werkstoffes folgt der Ätzabtrag bevorzugt bestimmten Kristallebenen. Um diese Nachteile umzugehen, bietet sich die Mikrozerspanung zur idealen Herstellung mikromechanischer Strukturen an.

Die herkömmlichen Spanabtragsprozesse können mit der Verminderung der Werkzeuggröße, mit der Vergrößerung der Maschinengenauigkeit, mit genug großen Drehzahlen und mit der Bestimmung der richtigen Prozeßführungsparameter wirtschaftlich im Mikrometerbereich eingesetzt werden.

Unter den Zerspanungsverfahren sind aufgrund der momentan benötigten Mikrostrukturbauteile in erster Linie Fräsen, Bohren und Drehen wichtig. Diese Fertigungsverfahren bieten die Möglichkeit, nahezu beliebig geformte mikromechanische Strukturen von 10 bis 1000 μm Größe mit hoher Flexibilität, Schnelligkeit und Formenvielfalt herzustellen (Tabelle 1).

Unter den konventionellen spanenden Verfahren bietet das Fräsen die größte Formvariabilität bei der Bearbeitung an. Das Mikrofräsen mit Werkzeugen, die Strukturgrößen auch unter 0,5 mm erzeugen, ist als Verfahren nicht grundsätzlich neu. Dabei wurde aber in den meisten Fällen auf günstiger zerspanbare Materialien – Kunststoffe und Nichteisenmetalle – verzichtet, weil die Zerspanung festerer Werkstoffe nicht sicher beherrscht wurde. Die dafür gut geeigneten Fräser bestehen aus Naturdiamant. Ein Diamantwerkzeug ist nicht nur teuer, sondern der durch die chemische Reaktionsfreudigkeit mit Eisenwerkstoffen bedingte hohe Werkzeugverschleiß schließt auch die Bearbeitung von Stahl damit aus.

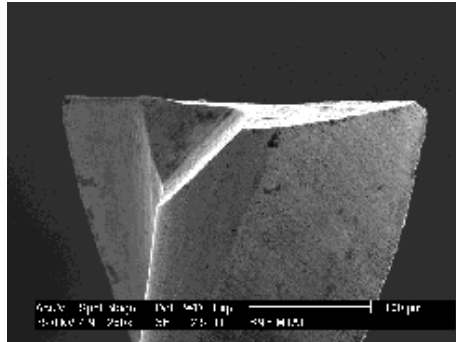


Abbildung 1. HM-Schaftfräser $\varnothing 300 \mu\text{m}$ der Firma "magaforce" (originale Vergrößerung: $\times 200$)

3. Neues Konzept für Mikrofräsen

Zur Erweiterung des Werkstoffspektrums der Mikrozerspanung auf Stahl, sowie zur Sicherstellung der wirtschaftlichen Erzeugbarkeit von dreidimensionalen Strukturen ist der Einsatz von Schaftfräsern aus Hartmetall eine wichtige Voraussetzung.

Durch empirische Vorgehensweise wurden die optimalen Zerspanungsparameter für einen solchen Bearbeitungsprozeß gesucht. Die Bauteilgeometrie wird einerseits durch das Werkzeug beeinflusst, andererseits spielen auch die Maschineneigenschaften eine entscheidende Rolle. Da die Abmessungen der einzelnen Elemente im Mikrometerbereich liegen, werden extrem hohe Anforderungen an die Arbeitsgenauigkeit und Langzeitstabilität der Bearbeitungsmaschine gestellt. Einige konventionelle Präzisionsmaschinen sind doch aufgrund ihrer Fertigungsgenauigkeiten prädestiniert, die Möglichkeiten und Grenzen der Mikrozerspanung zu ermitteln. Daher ist es wichtig, die grundsätzliche Eignung von vorhandenen Maschinen zu diesem Fertigungsbereich zu überprüfen und die erforderlichen Ausrüstungskomponenten zu ermitteln.

Für die Durchführung der Untersuchungen stand eine herkömmliche, 5-achsige vertikale, universale CNC-Bettfräs- und Bohrmaschine mit Kreutztisch vom Typ BOKÖ VH3/12 des Herstellers Böhner & Köhle zur Verfügung. Gesteuert ist sie von einer Fidia CNC Steuerung vom Typ FFM 178. Wegen der hohen Drehzahlanforderung bei so kleinen Werkzeugdurchmessern wurde eine spezielle Druckluftspindel mit $n = 65.000 \text{ U/min}$ für die Mikrozerspanversuche benutzt.

4. Das Werkzeug als einer der wichtigsten Umstände

Als Fräswerkzeug standen bei den mikrotechnischen Versuchen Produkte von 2 Firmen: "magaforce" und "HAM" zur Verfügung. Die verwendeten Durchmesser

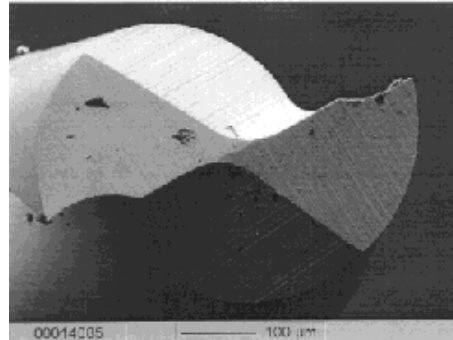


Abbildung 2. HM-Schaftfräser Ø600 µm der Firma HAM (o. V. : ×200)

von diesen unbeschichteten, zweischneidigen Hartmetall-Schaftfräsern betrugen Ø0,6 mm und Ø0,3 mm (*Bild 1* und 2). Beide gehören zur Zerspanungshauptgruppe K, sind auf WC-Basis mit Bindemittel Co gesintert. Sie besitzen Spanformrillen, aber die für solche Spanformrillen nötigen Fasern sind weder bei "HAM", noch bei "magaforce" zu entdecken. Diese sind wegen Kräfte bzw. aus thermischen Gründen notwendig. Der größte Unterschied zwischen beiden Werkzeugtypen liegt wahrscheinlich in der Formgebung der Spannuten. Das Werkzeug HAM ist länger, hat eine größere Spanformrinne, aber die Seelenbreite ist kleiner. Wahrscheinlich unterscheiden sie sich auch im Gefügezustand. Das zeigt auch das *Bild 3*, weil während beim Bruch vom 'magaforce' die Karbidkörner noch fest im Bindemittel sitzen, ist beim HAM gar kein Karbidkorn mehr zu sehen und das Bindemittel ist ausgelaufen, als sie geschmolzen wären.

Das *Bild 1* zeigt, daß die ganze Spitze des neuen Fräasers beim Schleifen des Werkzeuges abgebrochen wurde. An jeder Oberfläche des Fräasers kann man die Schleifabdrücke beobachten. Das läßt noch viel zu übrig in Verbindung mit der Feinbearbeitung solcher Mikrowerkzeuge.

5. Mikrozerspanungsversuche

Es wurden zwei, beim Zerspanen sich unterschiedlich verhaltende Werkstoffe untersucht: Messing (CuZn39Pb3) und Stahl (42CrMo4).

Als Versuchsform wurden symbolische Wärmetauscherschnecken in die Probekörper gefräst (*Bild 4*). Als Schaftfräsergabe besteht diese Formen aus rechteckigen Nuten. Sie bieten eine Menge von sehr nützlichen Nachprüfmöglichkeiten an, mit denen man den Werkstoffeigenschaften und selbst den Prozeß beurteilen kann. Die Zustelltiefe des Werkzeuges verändert sich entlang der gefrästen Schneckenform, was eine 3D-Bearbeitung der Probekörper bedeutet. Während der Untersuchungen wurden Härtemessung, energiedispersive chemische Analysierung, Licht- und Elektronmikroskopie verwendet.

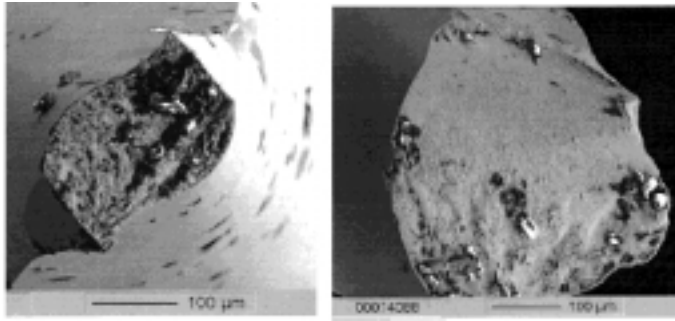


Abbildung 3. Gebrochene "magaforce" (o. V. : $\times 200$) - bzw. HAM-Schaftfräser (o. V. : $\times 200$)

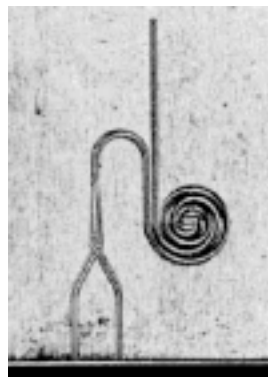


Abbildung 4. Gefräste Mikrostruktur

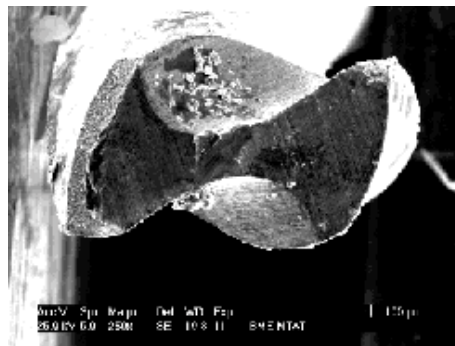


Abbildung 5. Asymmetrisch verschleite Schaftfräser (o. V. : $\times 200$)

Tabelle 2. Verwendete Versuchsparameter

Werkstoff	CuZn39Pb3
Härte	161 MHV 0,5
Werkzeuge	magaforce 8500
Werkzeughärte	1750 MHV 0,2
Fräserdurchmesser	Ø 0,3 mm
Schnitttiefe	0,15 → 0,3 mm
Zahnvorschubbereich	0,23...1,75 μm
Drehzahl	65000 1/min
Schnittgeschwindigkeit	61 m/s

6. Mikrozerspanung von Messing

Die Probekörper aus Messing wurden durch "magaforce" Schaftfräser Ø 300 μm gefräst. Während dieser Messung wurde der Zahnvorschub variiert, die Zustelltiefe aber nicht verändert. Die verwendeten und variierten Prozeßführungsparameter sind in der *Tabelle 2* zusammengefaßt.

Mit der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit verbessert sich bemerkenswert die Güte der Nute. Zahnvorschub $f_z = 1 \mu\text{m}$ zeigt das beste Bearbeitungsergebnis. Man bekommt einen sehr guten ersten optischen Eindruck der gefrästen Oberfläche und gutes Standzeitvermögen der Werkzeuge trotz zusätzlicher Abdrängkraft. Ein schnellerer Verlauf ($f_z = 1,15 \dots 1,75 \mu\text{m}$) verursacht aber den ganz schnellen Bruch der Werkzeuge. Der Bruch erfolgt immer in der Wurzel der Spitze, wo die Biegebeanspruchung am größten ist, exakt nach dem intensiven Verschleiß der Kante infolge der dadurch erhöhten Kräfte. Ganze Stücke sind ausgehend von der Werkzeugspitze entlang der Kante abgebrochen. Der Verschleiß verteilt unsymmetrisch auf den Schneiden (*Bild 5*). Daraus folgt, daß wegen der Unzentriertheit des Fräasers die eine Schneide mehr im Eingriff ist, als die andere. Deshalb brauchen sich diese Schneide schneller ab. Selbst bei extrem kleinen Maßen solcher Werkzeuge können sich die Radien der entgegengesetzten Schneiden in einigen μm unterscheiden. Beim Feinschleifen des Werkzeuges können solche Abweichungen entstehen. Bei einem Zahnvorschub von etwa 1 μm bedeutet es, daß effektiv nur eine Schneide im Kontakt ist.

Die Späne sind sehr gute Beurteilungsgründe für den Ablauf des Prozesses. Man kann feststellen, daß bei allen untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten vollständige Spanabtrennung erfolgt ist. Umformungsprozesse waren nicht festzustellen.

Wegen des Werkstoffes und der Parameterbereiche lassen sich die abgelaufenen Späne als Scherspan und als Fließspan einordnen (*Bild 6*).

Der Werkstoff verhält sich duktil, es sind Lockenformen ausgebildet. Neben kleinerem Zahnvorschub sind die Ränden noch unregelmäßig und abbrüchig, aber mit der Erhöhung des Vorschubes entstehen immer saubere und längere Formen.

Die Grundflächenqualität der Nut ist gleichmäßig, in dem untersuchten Vorschubbereich gibt es keine große Abweichungen. Auch die Gratbildung ist unstörend. An der Grundoberfläche kann man die einzelnen Riefen beobachten, die durch den Eingriff der Werkzeugschneiden hervorgerufen werden. Nach der Vermessung ist es aber klar geworden, daß diese Abstände etwa $(1,5 \dots 2) \cdot f_z$ betragen. Das unterstützt die Folgerungen in Verbindung mit den Werkzeugen, daß wahrscheinlich immer nur eine Schneide richtig im Eingriff ist, die andere schneidet nichts, oder nur sehr wenig. Das bedeutet, daß auf eine Schneide eine doppelt so große Belastung kommt, wie es bei der Vorschubgeschwindigkeitseinstellung geplant wurde.

Manchmal kommen Spanüberstreichungen in der Grundfläche vor (*Bild 7*). Dieser Effekt ist bei langsameren Vorschubgeschwindigkeiten bzw. in den Krümmungen wahrscheinlich stärker.

Aus den Bildern geht hervor, daß der Fräser einen bedeutenden Formfehler verursacht hat (*Bild 8* und *9*). Die Grundfläche der Nut ist immer parallel mit der Probenoberfläche, die beiden Wände sind aber nicht senkrecht zu den vorigen. Ebenso fällt auf, daß die Größe der Winkelabweichung mit der Dreh- und Bewegungsrichtung des Fräasers in Zusammenhang gebracht werden kann. Die größte Abweichung beträgt durchschnittlich 10° . Die Größe des Wandorientierungsfehlers beträgt sowohl bei der kleineren, als auch bei der größeren Vorschubgeschwindigkeit etwa denselben Wert. Dieser Formfehler der Nut steht zu der Formgenauigkeit des Fräasers nicht in Beziehung. Nach der Ansicht dieses Formfehlers habe ich diesen Effekt als "Besen-Effekt" benannt. Der Grund dafür ist die elastische Verbiegung der schlanken Fräerspitze durch Abdrängkräfte. Die Stegbreite schwankt deutlich, insbesondere im Schneckenzentrum, was auf die Maschineneinflüssen zurückgeführt werden kann.

Die Unebenheit der Nutfläche ist ein Ergebnis der unterschiedlichen Elastizitätsmodulen, Härte und Verfestigungsfähigkeit der verschiedenen Gefügefaser. Beim Mikrofräsen ist die Durchschneidung der einzelnen Körner eine der wichtigsten Fragen (*Bild 10*). Beim Überschritt der Korngrenze verändert sich unter anderen die Kornorientierung, das E-Modul und dadurch der Widerstand des Werkstoffes, was eine starke, dynamische Belastung des Werkzeuges verursacht.

Nach der Durchtrennung der Körner federn sie sich in verschiedenen Richtungen, um die an erhöhten inneren Spannungen zu eliminieren.

Gegenüber der Nuten durch Umfangsfräsprozeß kommt beim solchen Schaftfräsen keine Randzonenverfestigung vor.

Die Aufrissenheit der Seitenwände kann schon mit den Zerspaneigenschaften des Fräasers in Beziehung stehen.

Die maximale vorkommene Kraft beträgt bei Messing in dem verwendeten Parameterbereich 4 N. Auch nach dem Kraftverlauf kann man aussagen, daß die Schneiden nicht gleichmäßig im Eingriff waren.

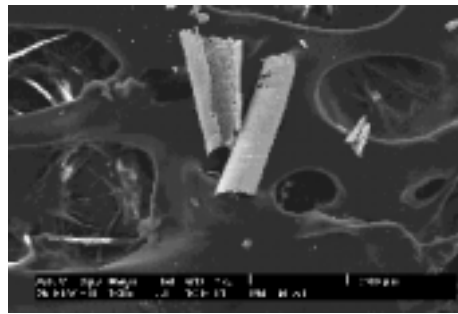


Abbildung 6. Messingspäne bei $v_c = 61$ m/min, $f_z = 1$ μ m, $n = 65000$ 1/min (o.V.: $\times 100$)



Abbildung 7. Spanüberstreichung (o.V.: $\times 1500$)



Abbildung 8. Formfehler durch Fräserdeformation (o.V.: $\times 150$)

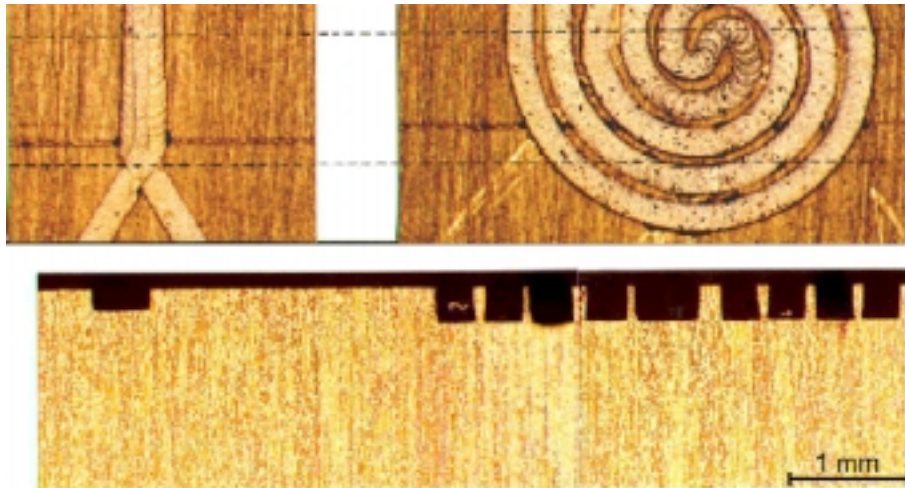


Abbildung 9. Mikrogefräste Nuten in Messing (o.V.: $\times 25$)



Abbildung 10. Korndurchschneidungen bei Messing (o.V.: $\times 1000$)

Tabelle 3. Verwendete Versuchsparameter bei Stahl

Werkstoff	42CrMo4
Härte	260 MHV 0,5
Werkzeuge	magaforce 8500 HAM 421
Werkzeughärte	1750 MHV 0,5
Fräserdurchmesser	\varnothing 0,3 mm, \varnothing 0,6 mm
Schnitttiefe	0,05... 1 mm
Zahnvorschubbereich	0,2... 1,75 μ m
Drehzahl	65000 1/min
Schnittgeschwindigkeit	61 m/s, 122 m/s

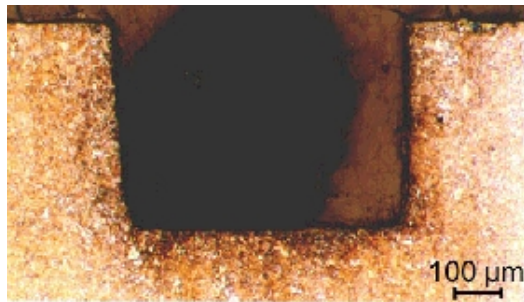


Abbildung 11. Gefräste Nut in Stahl (o.V.: $\times 100$)

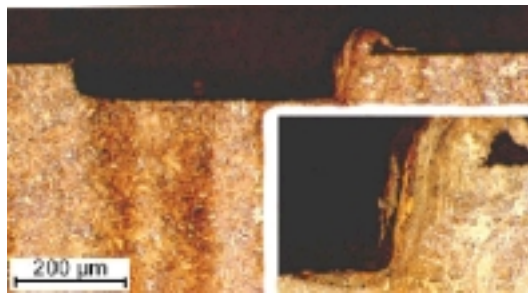


Abbildung 12. Umformungserscheinung bei kleiner Schnitttiefe (o.V.: $\times 100$)

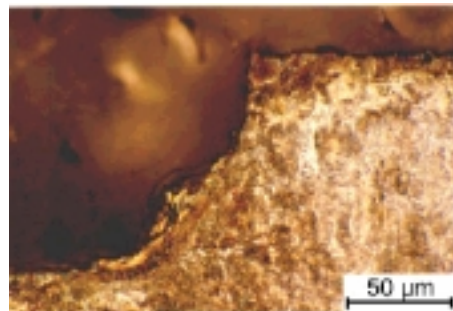


Abbildung 13. Formfehler in der Ecke der Nut durch Kantenspitzendefekt (o.V.: $\times 500$)

7. Mikrozerspanung von Stahl

42CrMo4 ist ein zäheres, verformfähigeres Material, kann als mittelmäßig zerspanbarer Werkstoff eingeordnet werden. Alle Späne sehen sich als Scherspan einordnen zu lassen. Bei Stahlspänen gibt es gar nicht so große Unterschiede zwischen den Spanformen der verwendeten Prozeßparameter, wie bei Messingspänen. Bemerkbare Unterschiede gibt es nur zwischen den Spänen von beiden Werkzeugen. Die Ränder der HAM-Späne sind gebröckelt und abbrüchig. Die Ränder der "magaforce"-Späne sind regelmäßiger, die Späne mehr fortlaufend und lamellierter.

Diese Abweichungen erkläre ich mit den unterschiedlichen Schnittformen der Werkzeuge.

Das Bearbeitungsergebnis ist sehr stark vom eingesetzten Werkzeug abhängig. Prozeßparameterwahl ist dagegen sekundär. Nach den Aufnahmen ist es zu ermitteln, daß der Fräser von Typ HAM einen sehr bedeutenden und scharfen Grat nachläßt. Die Gratbildung kommt immer an der rechten Seite der Bewegungsrichtung, also in der Gleichlaufphase vor. Die Schneide dieses Fräasers streicht das Material über den Rand der Nut auf. Der HAM- Fräser kratzt auch nach hinten. Neben zu kleinen Schnitttiefen kommt kein richtiges Materialabtrennen mehr vor, lieber eine Umformung (*Bild 12*). Der Fräser "magaforce" schneidet schon viel mehr gleichmäßiger, ohne Nahckratzung, und auch die Gratbildung kann vernachlässigt werden. Ähnlich zum Messing kommen keine Randzonenbeeinflussung oder Verfestigungserscheinungen durch das Schaftfräsprozeß vor. Die mit dem HAM gefrästen Oberflächen, besonders die Grundflächen sind ungleichmäßig, abbröckelt und ausgestreicht. Mit der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit wird die Anzahl der Rissen größer. Diese sind wahrscheinlich Warmrisse, und stammen aus den Kantenfehlern des Fräasers. Auch die starke Gratbildung unterstützt die vorigen Bemerkungen. Im allgemeinen kann man aussagen, daß in diesem Vorschubbereich die Rauigkeit unabhängig vom Zahnvorschub ist.

Bei der Untersuchung der Messingprobekörper war der bedeutendste Formfehler der "Besen-Effekt". Hier ist dieser Formfehler auch zu bemerken, aber in wenigerem Maße. Das könnte mit der kleineren Schnitttiefe und dem härteren Werkstoff erklärt werden. Bei den Stichproben, die mit dem Ø 0,6 Fräser gefertigt waren, kommt dieser Effekt nicht mehr vor. Auch diese Versuche bestätigen, daß solche Formfehler durch die Verbiegung der Fräterspitze verursacht sind und nicht durch die Herstellungstoleranz der Spindellagerung. Die Nuten gefräst mit dem HAM können formgerecht erklärt werden, aber diese Fräser verschleifen sich relativ schnell. Die Formgenauigkeit der Nuten gefräst mit den "magaforce"-Fräsern weist unterschiedliche Qualität auf. Im allgemeinen kann man kleinere Fehler durch den Kantenspitzeneffekt in den Ecken der Nut bemerken (*Bild 13*). Diese erhöhen sich spektakulär mit dem Vorschritt des Fräserverschleißes.

In dem verwendeten Parameterbereich betragen die Kräfte maximal 7,5 N.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Mikrofräsen durch Hartmetall-Schaftfräser bedeutet eine wirtschaftliche Fertigungsalternative für Kleinserien und Einzelteile. Es bietet die Möglichkeit, relativ "große", nahezu beliebig geformte mikromechanische Strukturen auch von Stahl mit hoher Flexibilität und Schnelligkeit herzustellen. Die Qualität der Oberfläche und Geometrie hängt in erster Linie von dem verwendeten Werkzeug und der Maschine ab. Nicht nur die Schärfungsprobleme, sondern auch die geometrische Ausbildung, bzw die Werkstoffeigenschaften des Werkzeugs können noch heute unter anderem eine starke Gratbildung und Formfehler durch die Deformation der Spitze verursachen. Die Durchschneidung der einzelnen Körner ist beim Mikro-schaftfräsprozeß eine sehr wichtige Frage.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen soll die Prozeßsicherheit beim Mikrofräsen verbessert werden. Eine bessere Werkzeugherstellung, die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit durch eine entsprechend große Drehzahl (min. 100.000 U/min) und die Verwendung einer hochpräzisioneren Mikrofräsmaschine können nicht nur die Werkzeugbruchgefahr vermindern, sondern auch die Bearbeitungsqualität verbessern. Weiterhin sollte das Werkstoffspektrum an andere, in der Industrie sehr wichtige Werkstoffe ausgedehnt werden. Die Herstellung von konkreten Werkstücken für industrielle Anwendung würde die Entwicklung an diesem Gebiet beschleunigen.

Literatur

- [1] WEINART, K. – GUNTERMANN, G. – SCHWIETERING, CH.: Mikrofräsbearbeitung schwerer-spanbarer Werkstoffe, *Werkstattstechnik* Nr. 88 (1998) H. 11/12
- [2] HOFFMEISTER, H.-W. – GÄBLER, J.: Mikrosysteme in der Fertigung – Fertigung von Mikrosystemen, *Mitteilung der TU Braunschweig*, Jahrgang XXXI, Heft II/1996.
- [3] WECK, M. – VOS, M.: Gedrehte und gefräste Mikrostrukturen, *VDI-Z* 137 (1995), Nr. 7/8.
- [4] VOS, M. – WECK, M.: Der Span erobert die Mikrosystemtechnik, *Transfer* **44**, 1995.
- [5] WESTKÄMPFER, E. – HOFFMEISTER, H.-W. – GÄBLER, J.: Spanende Mikrofertigung.